

# Aktiiviset häiveantenniradomit taajuushyppiviin tutkiin

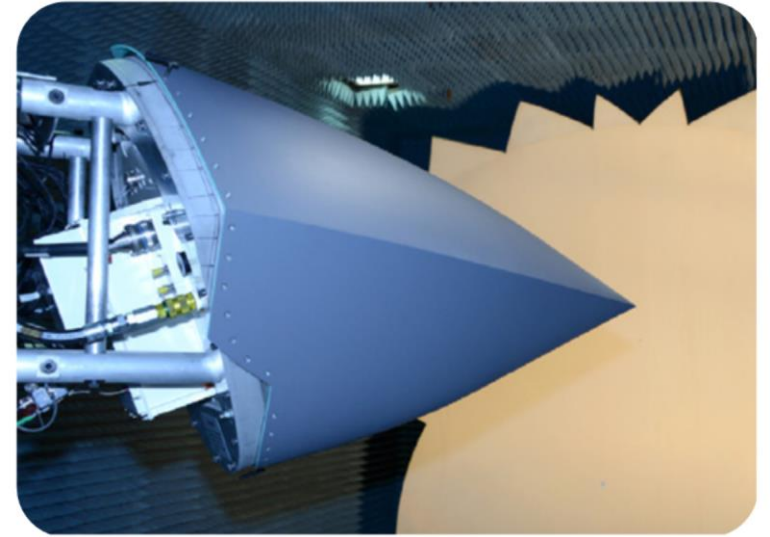
TkT Mikko Heino, Tampereen yliopisto

MATINE-hanke 2024-2025, 1. vuosi

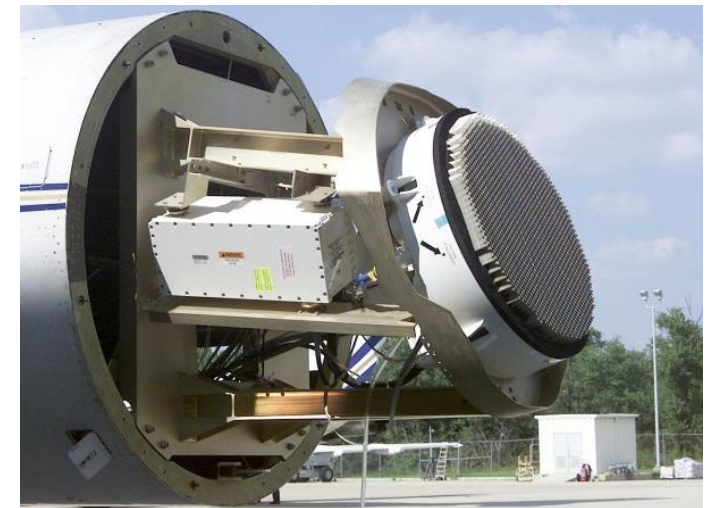
Myönnetty MATINE-rahoitus 100 208 €

# Tutkimusongelma

- Tutkaradomit suojaavat tutkan rakennetta
  - Sään vaikutus, tutkan naamiointi, aerodynamiikka
  - Perinteisesti vaikutus säteilyyn minimoitu laajalla kaistalla
- Tutkalla iso tutkapoikkipinta-ala
  - Heijastava metallinen rakenne
  - Resonoiva rakenne, ideaalitapauksessakin puolet tehosta siroaa
  - Vaikutuksen minimointi tutkan kääntämisellä sekä kiinteillä kaistanpäästö-radomeilla
- Tarve piilottaa tutka kun se ei ole käytössä
  - **Tarve säädettäville älykkäille radomeille**
  - Signaalin läpäisy haluttuna aikana tietyllä taajuuskaistalla
    - Muutoin joko absorboiva tai heijastava
  - Taajuushyppivissä tutkissa pulssin keskitaajuus muuttuu



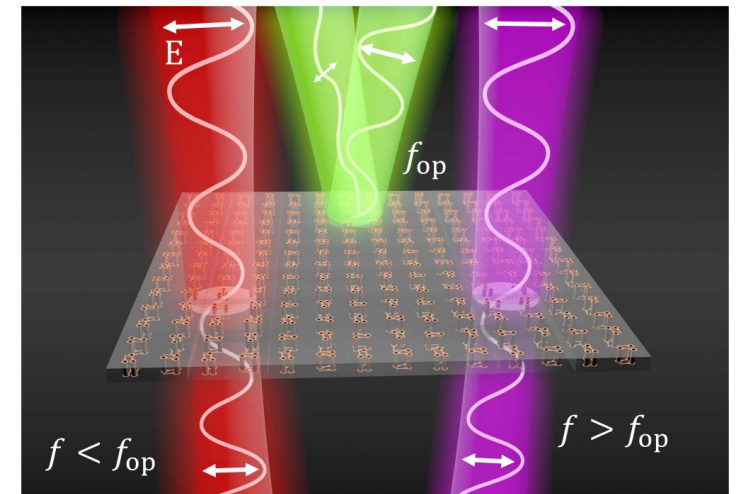
General Dynamics "Radomes – overview"



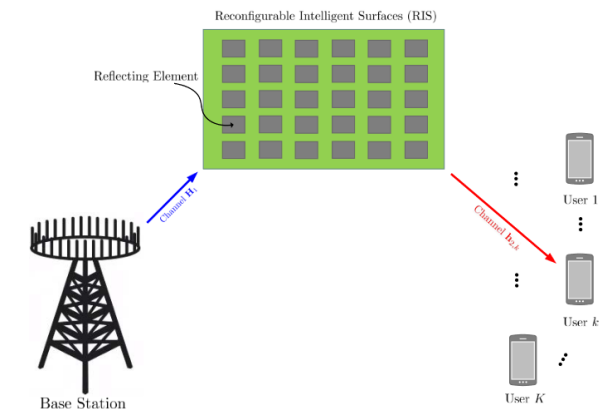
© Northrop Grumman

# Mahdolliset ratkaisut

- **Metamateriaalit**
  - Aallonpituutta selkeästi pienemmillä sähköisillä rakenteilla voidaan luoda keinotekoisesti haluttuja sähköisiä ominaisuuksia
- **Uudelleenkonfiguroitavat älykkäät pinnat (RIS)**
  - Sähköisiä ja magneettisia ominaisuuksia voidaan säätää
  - Myös aallonpituuden kokoluokan elementtejä
  - Heijastus- ja läpäisyominaisuudet muuttuvat



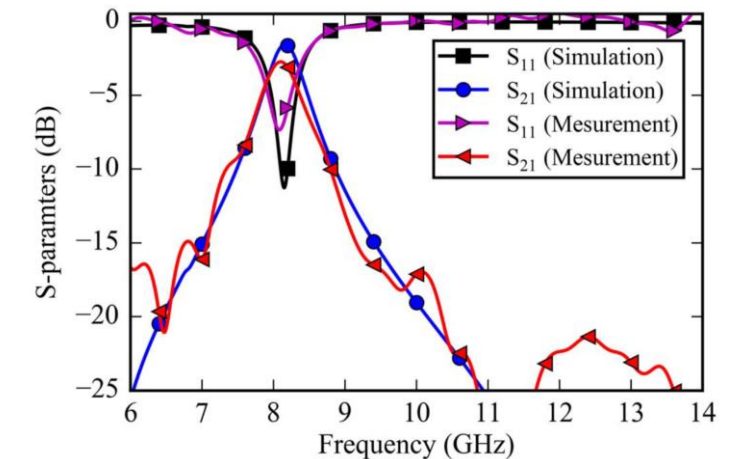
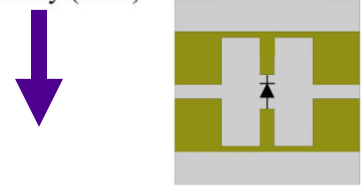
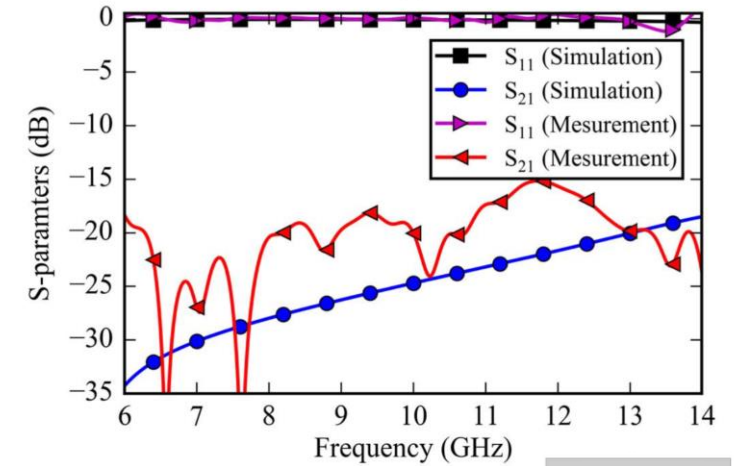
F. S. Cuesta et al., "Planar Broadband Huygens' Metasurfaces for Wave Manipulations," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 12, Dec. 2018



C. Huang et al., "Reconfigurable Intelligent Surfaces for Energy Efficiency in Wireless Communication," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 8, Aug. 2019

# Kirjallisuuskatsaus

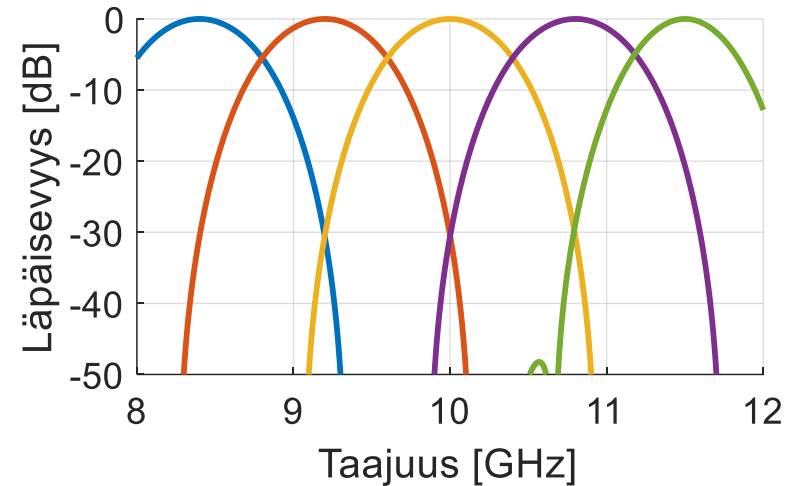
- Puolustusteollisuuden edistyneimmistä radomeista heikosti julkista tietoa
  - Kiinteitä passiivisia taajuusselektiivisiä pintoja käytössä edistyneimmissä radomeissa
- Tiedeyhteisössä aktiivisia taajuusselektiivisiä radomeja tutkittu
  - Aaltopituutta pienempiä metallirakenteiden johtavuutta säädetään PIN-diodeilla piirilevyratkaisuissa
  - Päästökaistojen määrä rajoittunut yhteen tai kahteen
  - Esim. Julkaisussa [9] 80% läpäisy 500 MHz:n kaistalla joko 7 GHz:n tai 8 GHz:n keskitaajuudella
- Ei tieteellisiä julkaisuja kaarevien pintojen ratkaisuista



[9] R. Phon, S. Ghosh ja S. Lim, "Novel Multifunctional Reconfigurable Active Frequency Selective Surface," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, osa 67, nro 3, Maaliskuu 2019.

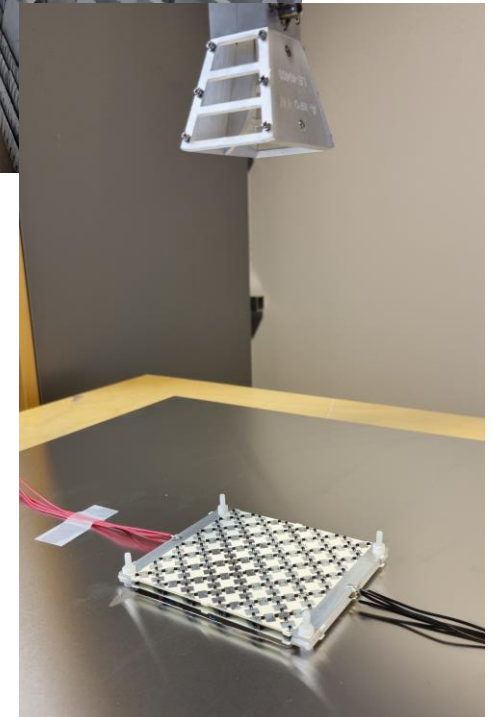
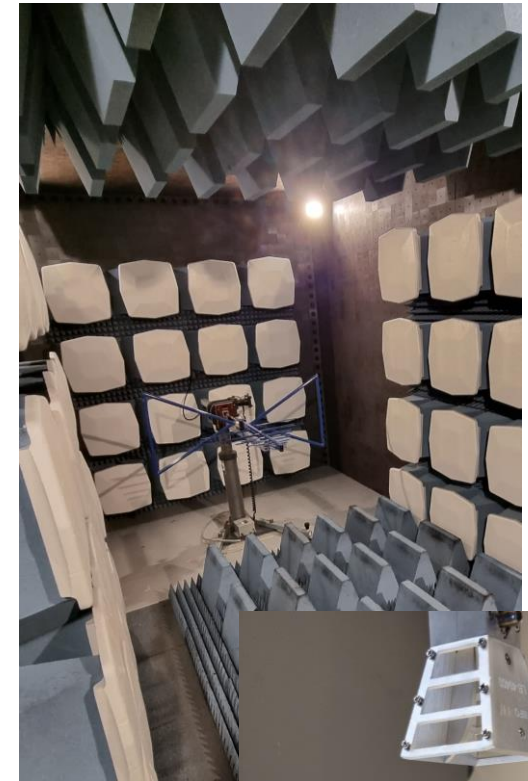
# Tutkimussuunnitelma

- Suunnitella uusia älykkäitä tutkaradomipintoja
  - **Koko kaistan läpäisy kytkettävissä kerrallaan päälle**
  - Usea säädettävä päästökaista (esim. yli 5 kpl)
  - Piirilevyrakenteet, usean eri taajuuden solut, monikerrosrakenteet PIN-diodeilla, säädettävät reaktiiviset komponentit, uudet metamateriaalirakenteet
  - Tulosten verifiointi mittauksin
- Vaikuttavuus
  - Mahdollistavat uusien pienemmän havaittavuuden tutkaradomien suunnittelun
  - Tieteellinen uutuusarvo, monikaistaiset rakenteet puuttuvat ja realistinen kahden polarisaation ratkaisu puuttuu
- **1. vuosi keskitytty koko kaistan aktiiviseen rakenteeseen ohjausryhmän palautteen perusteella**
  - Painotus päälle kytkettävään absorptioon



# Tutkimusmenetelmät

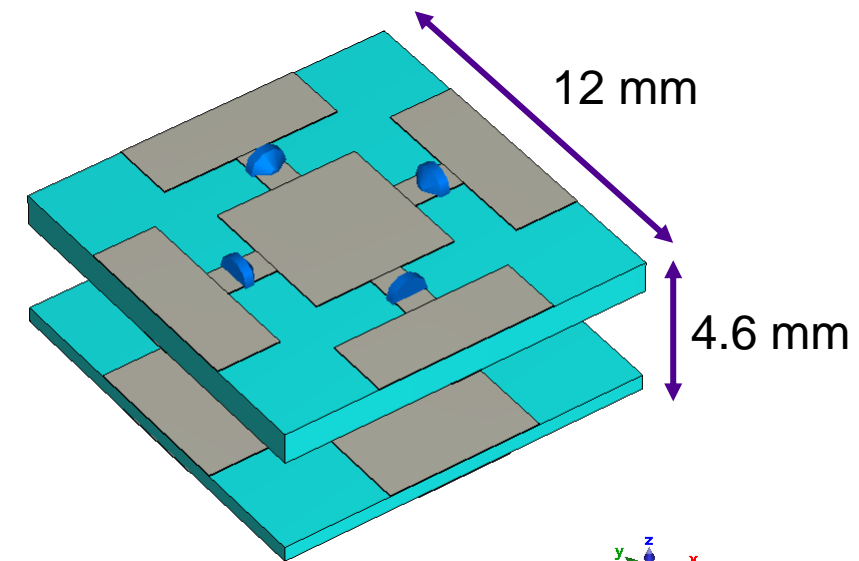
- Sähkömagneettiset simulaatiot
  - Taajuusselektiivisten pintojen suunnittelu ja simulointi sisällyttäen aktiiviset säätörakenteet
  - Simulaatioissa myös monimutkaiset kaarevat pinnat
- Prototyyppipintojen valmistus sekä mittaus
  - Pääosin aktiivisia tasaisia pintoja piirilevymateriaaleille
  - Lämpäisymittaukset



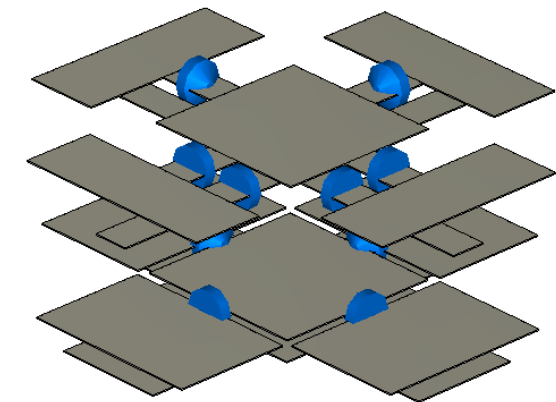


# Prototyypin rakenne

- X-kaistan aktiivisesti säädettävä radomi
  - Läpäisy kytkettävissä päälle/pois, muutoin absorboiva
- 4-kerroksen rakenne, joka toteutettu piirilevyllä
  - Toimii molemmilla polarisaatioilla
  - Diodien johtavuutta säätämällä säädetään pinnan läpäisyä
    - OFF-tilassa tehoa palaa diodien resistanssiin, absorptio
  - Perustuu rakenteeseen jossa patch-elementtejä kytketty toisiinsa ristikkäin diodeilla [1]
- Pieni heijastavuus ja häviöt rakenteen läpi kilpailevia ominaisuuksia
  - 2 ensimmäistä kerrosta
    - Heijastusten minimointi, ja häviöiden aiheuttaminen
  - 2 seuraavaa kerrosta
    - Läpäisyn minimointi



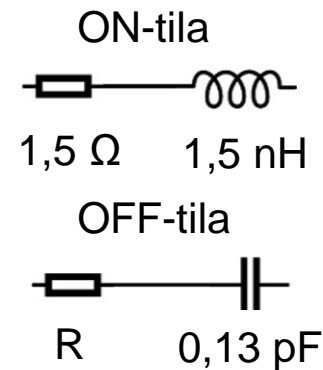
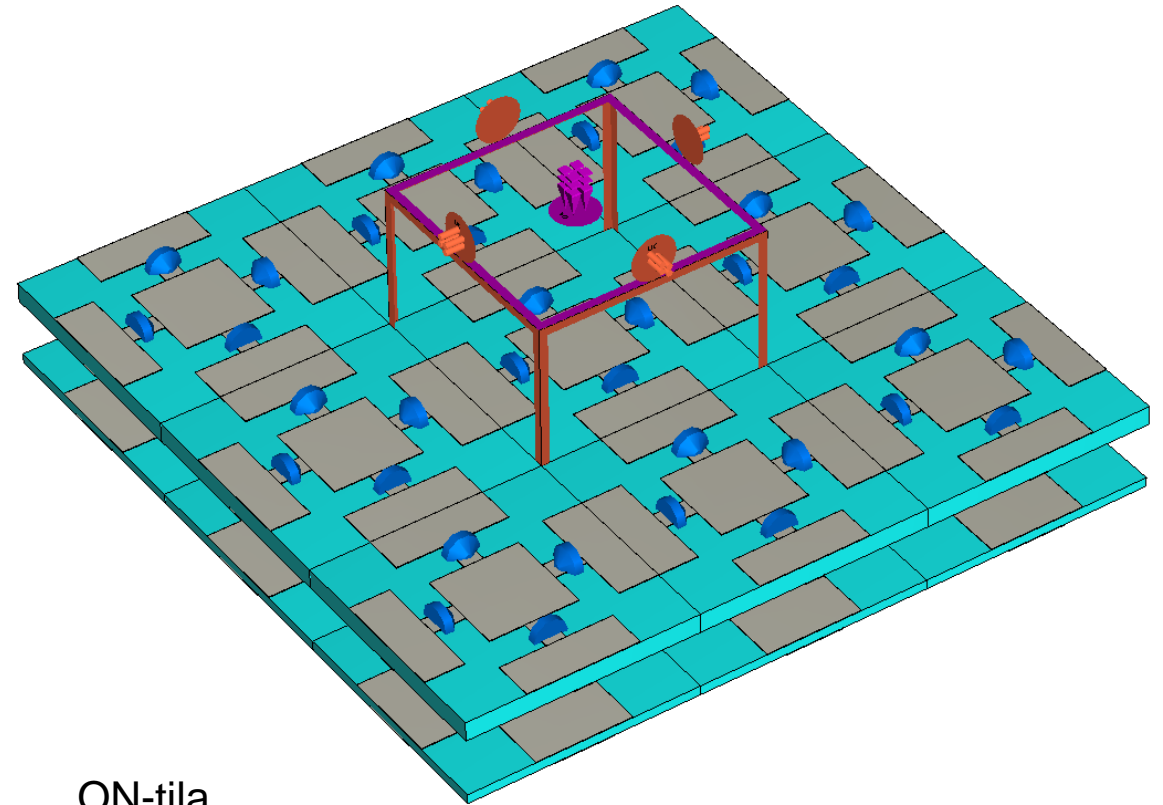
Yksikkösolu



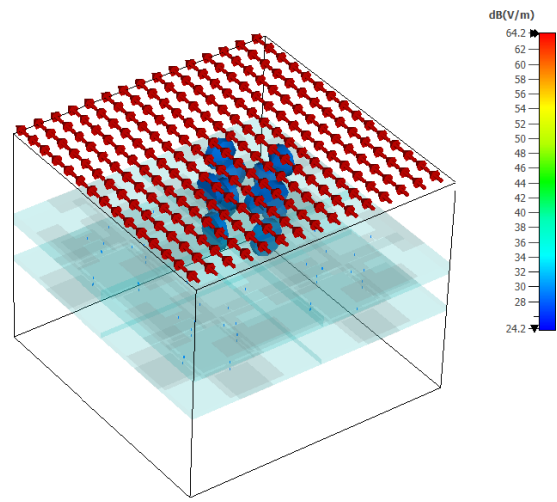
[1] M. Zhao, M. Zhu, Z. Wu, B. Wang, Y. Wang and Q. Cao, "A Switchable Absorption/Transmission Active Frequency Selective Surface," 2022 *International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China)*, Xuzhou, China, 2022

# Simulointiympäristö

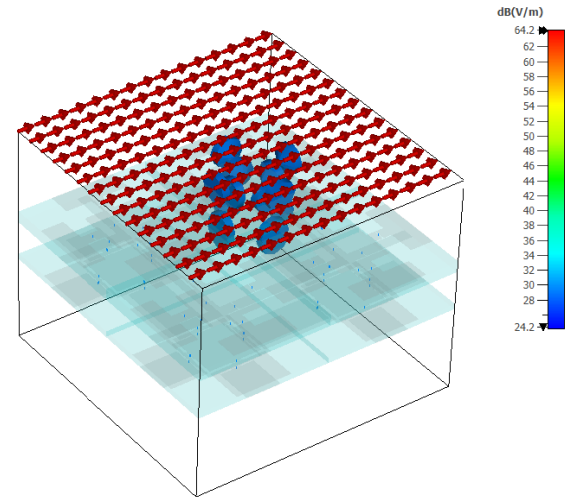
- Rakennetta simuloitu yksikkösoluina FEM-solverilla
  - Periodiset reunaehdot, ääretön pinta
  - Ratkaisuna periodisen rakenteen Floquet-porttimoodit
- NPX BAP50-03 PIN-diodia käytetty kytkimenä
- Diodi mallinnettu biasoituna on- ja off-tilaan



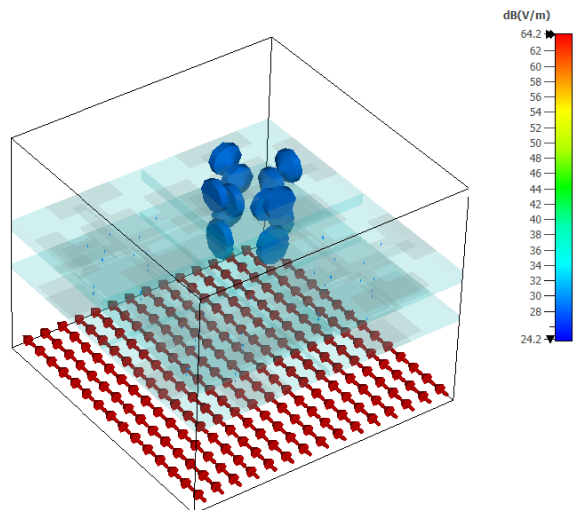




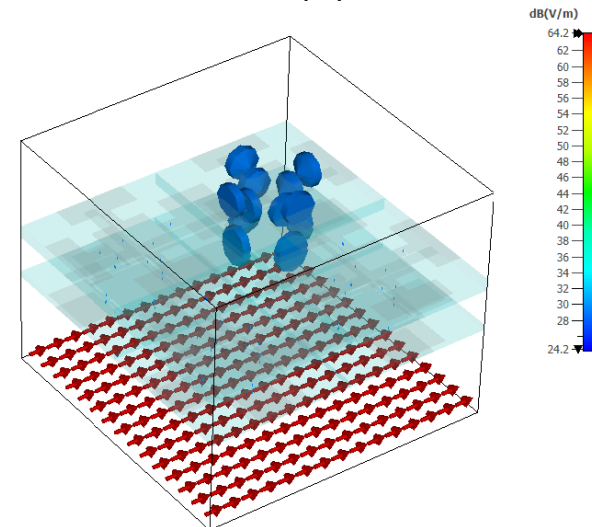
Zmax(1)



Zmax(2)



Zmin(1)

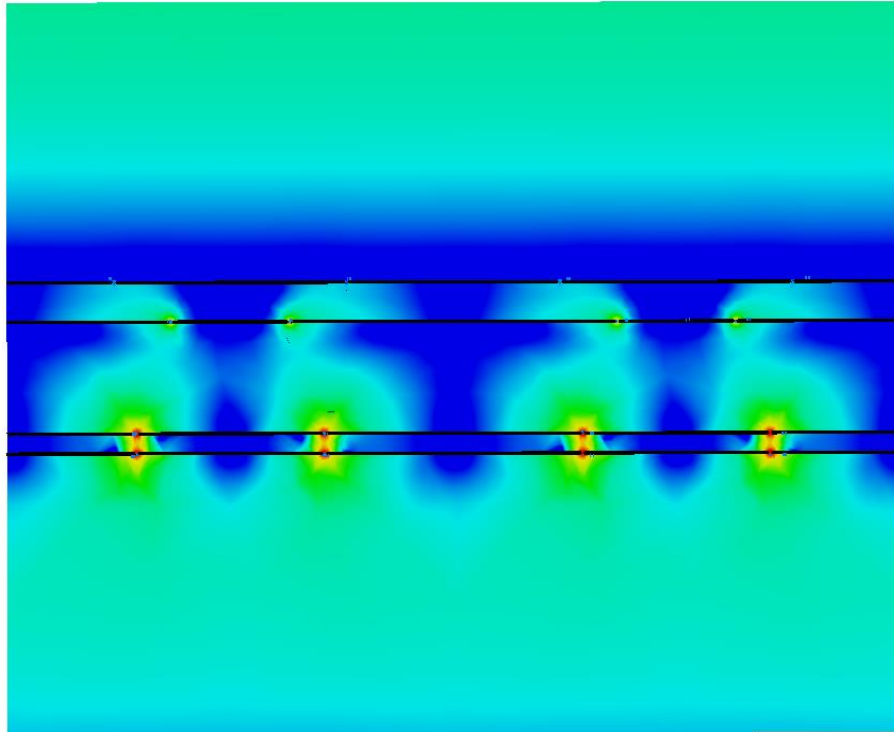


Zmin(2)

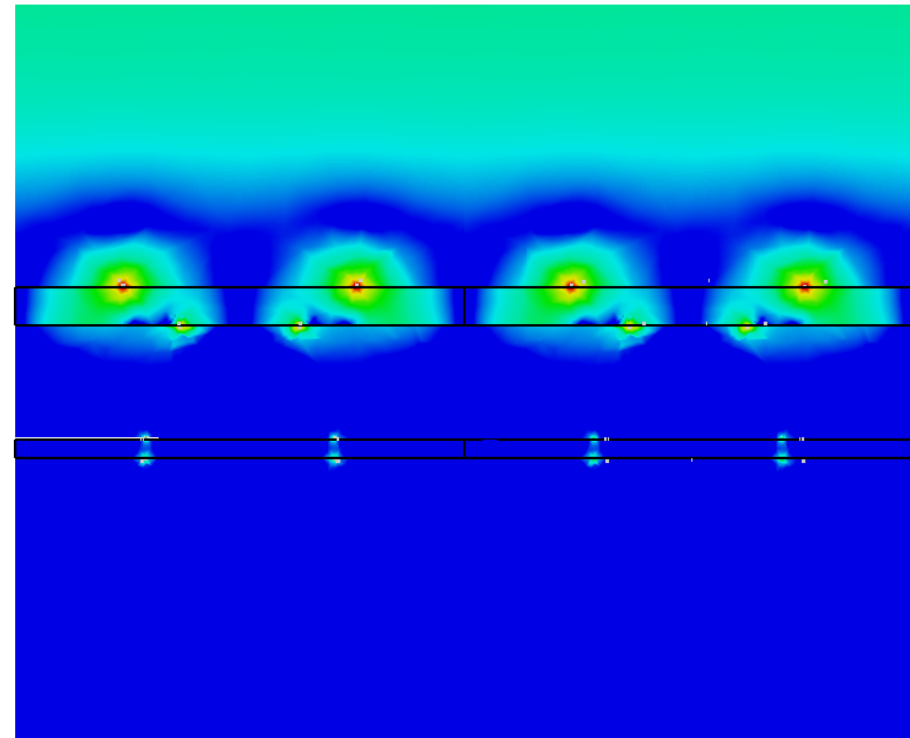
Läpäisy:  $S(Zmin(1), Zmax(1))$

Heijastavuus:  $S(Zmax(1), Zmax(1))$

# Toiminta

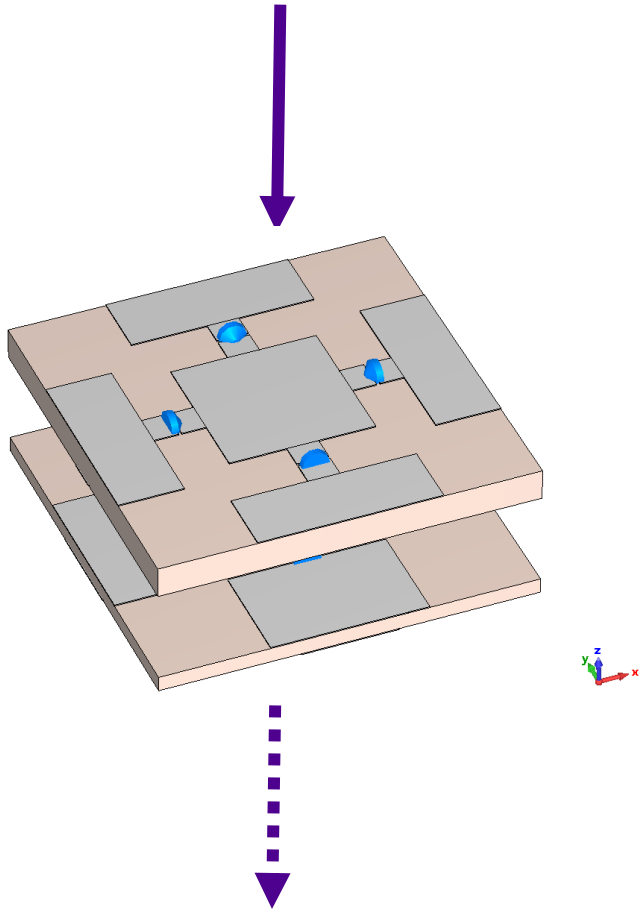


ON-tila

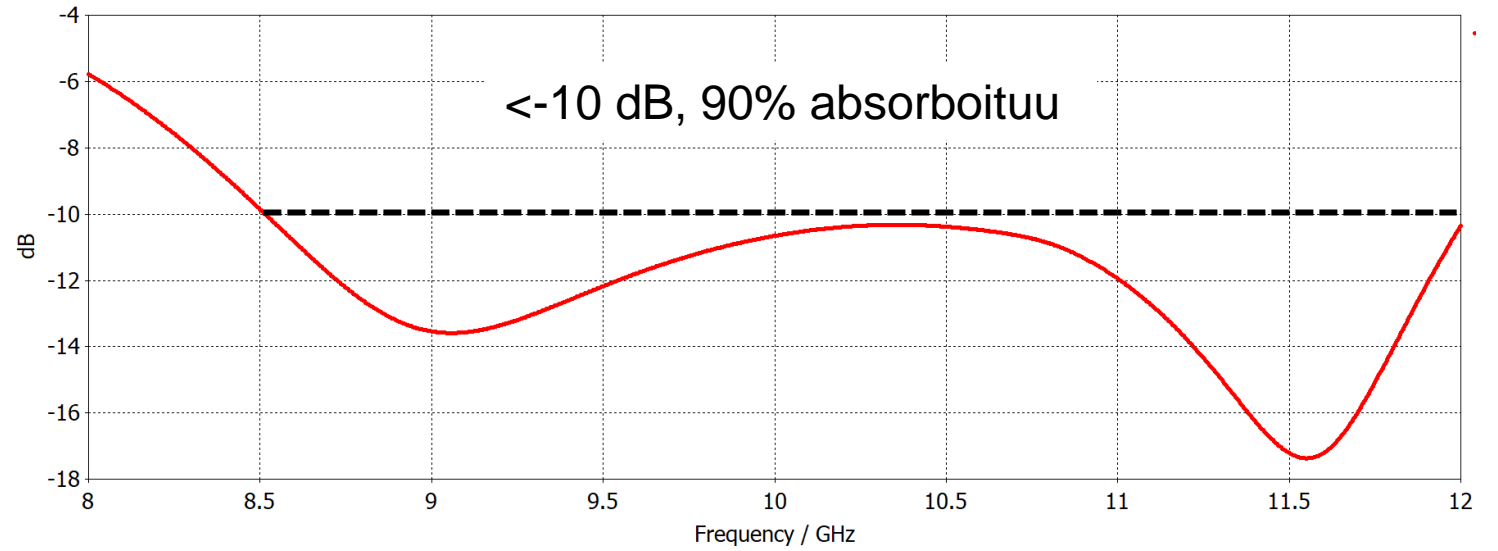


OFF-tila

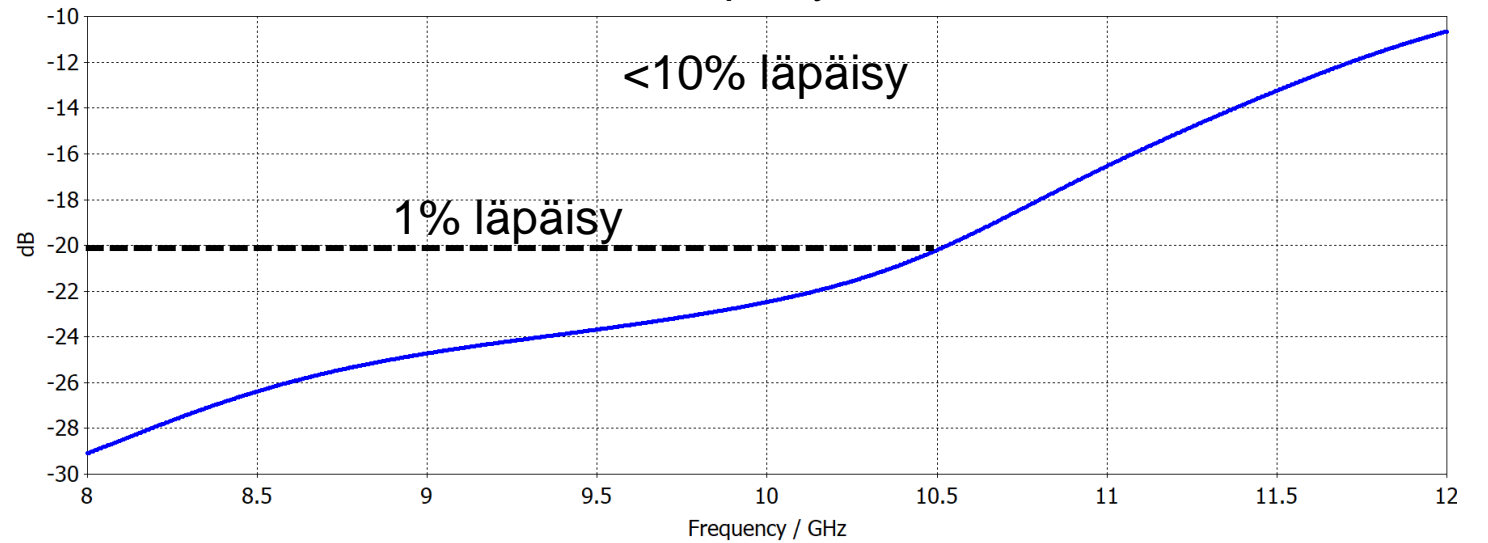
# S-parametrit OFF-tilassa



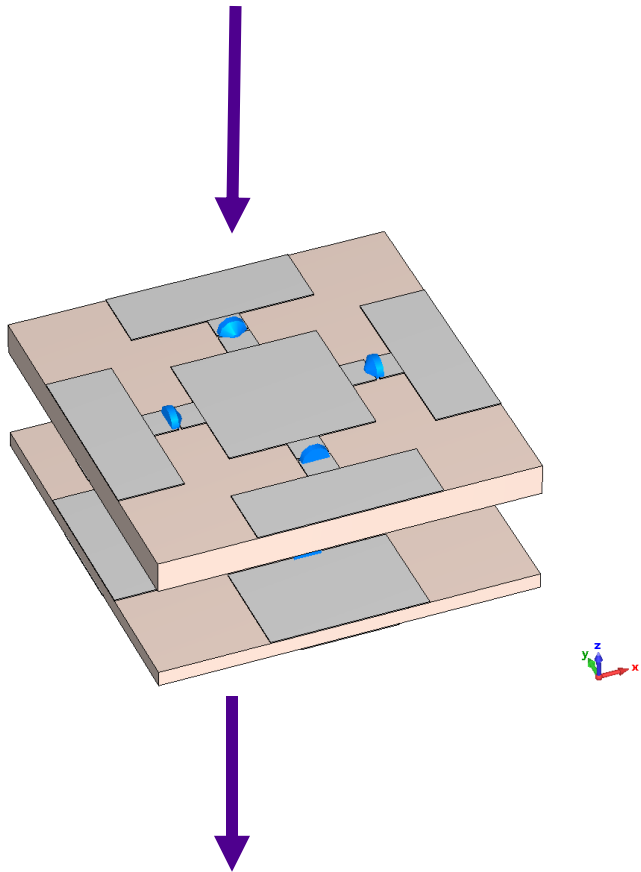
### Heijastavuus



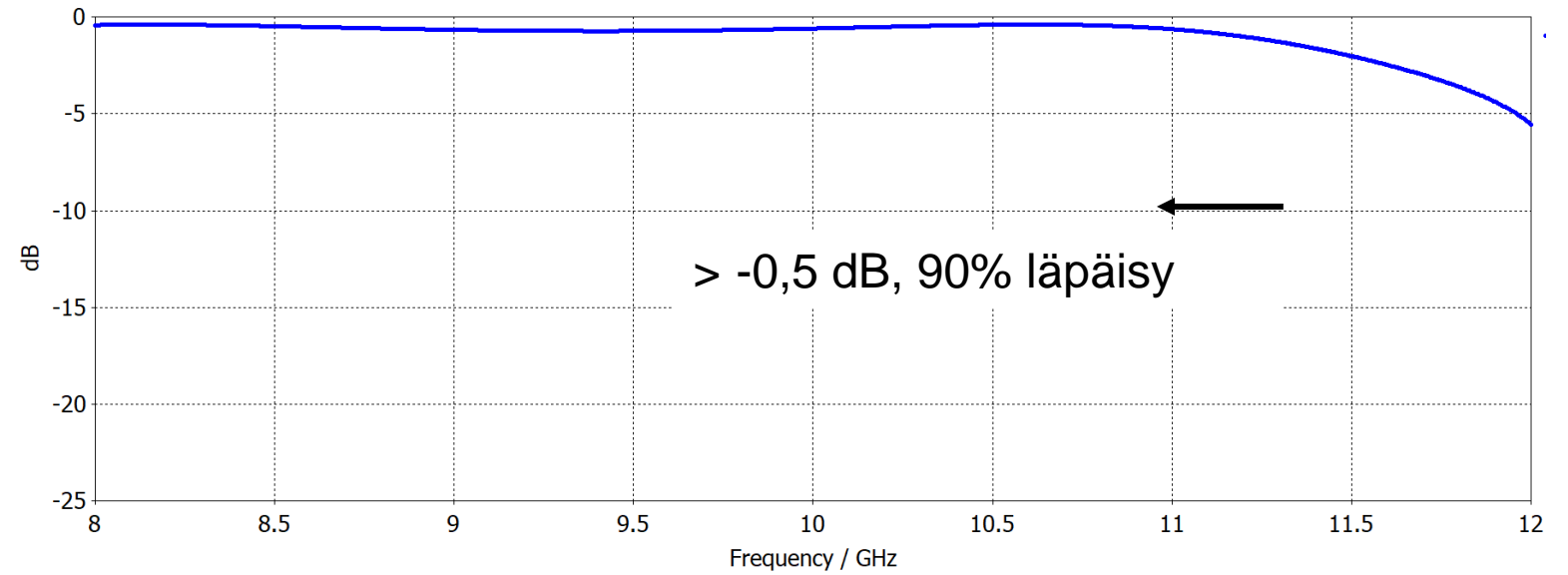
### Läpäisy



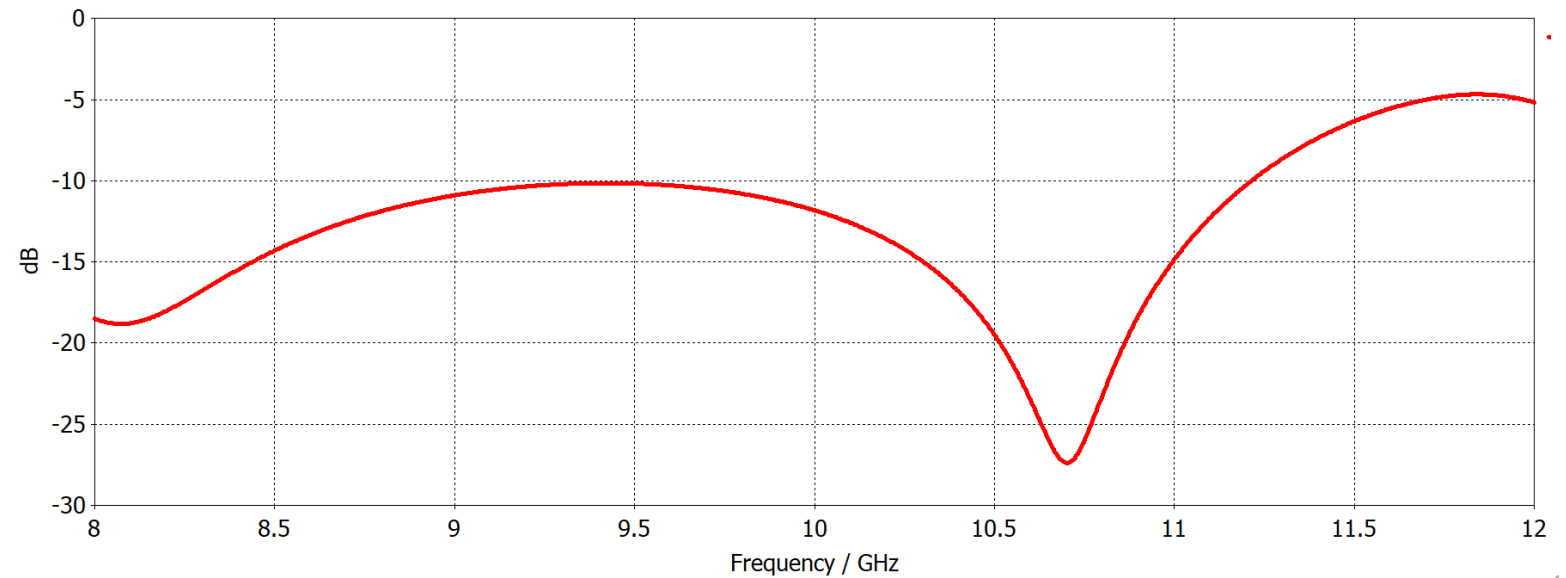
# S-parametrit ON-tilassa



## Läpäisy

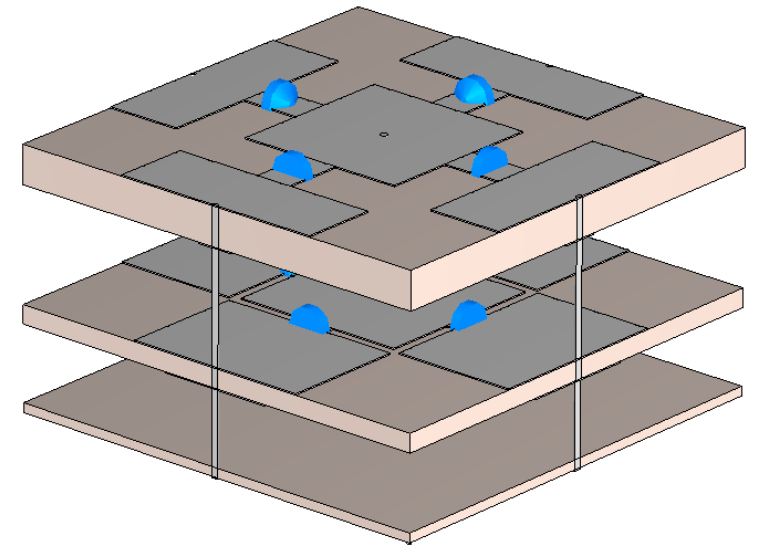


## Heijastavuus



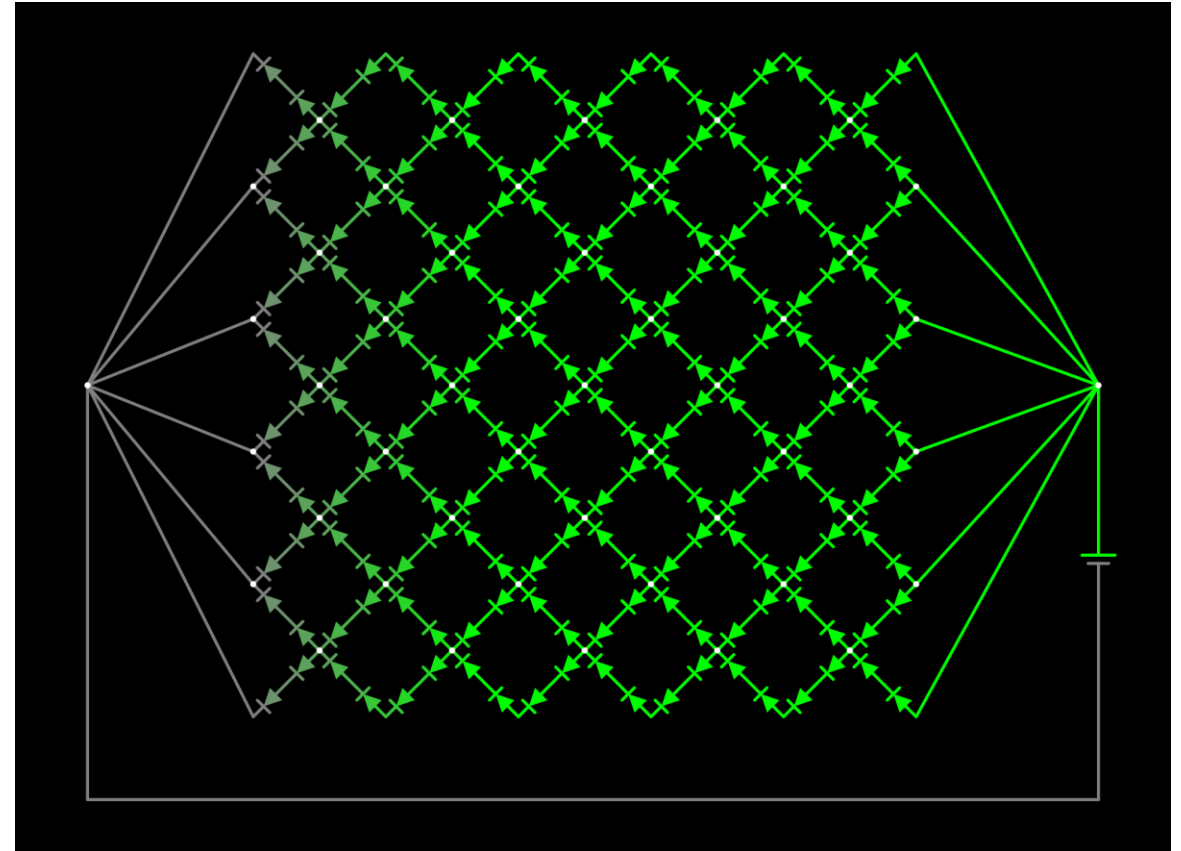
# Diodien biasointirakenne

- Oikeassa prototyypissä diodeille tarvitsee saada oikeat biasointijännitteet
  - Kirjallisuudessa ei ratkaisuja kahden polarisaation rakenteelle
- Haasteena syöttörakenteen suunnittelu niin että ei vaikuta heijastus- eikä läpäisykertoimeen
- Ylimääräinen syöttölevy ja pinnit lisäsivät läpäisyhäviöitä 3 dB



# Ratkaisu

- Diodiverkkoa voidaan syöttää levyn reunoilta sarjaankytkettynä
  - Diodien biasointi epätasainen
- 45-asteen diodiverkolla saadaan yhtäsuuri biasointivirta jokaisen diodin läpi
  - Ylimääräistä syöttölevyä ei tarvita
  - Biasoi molemmat polarisaatiot



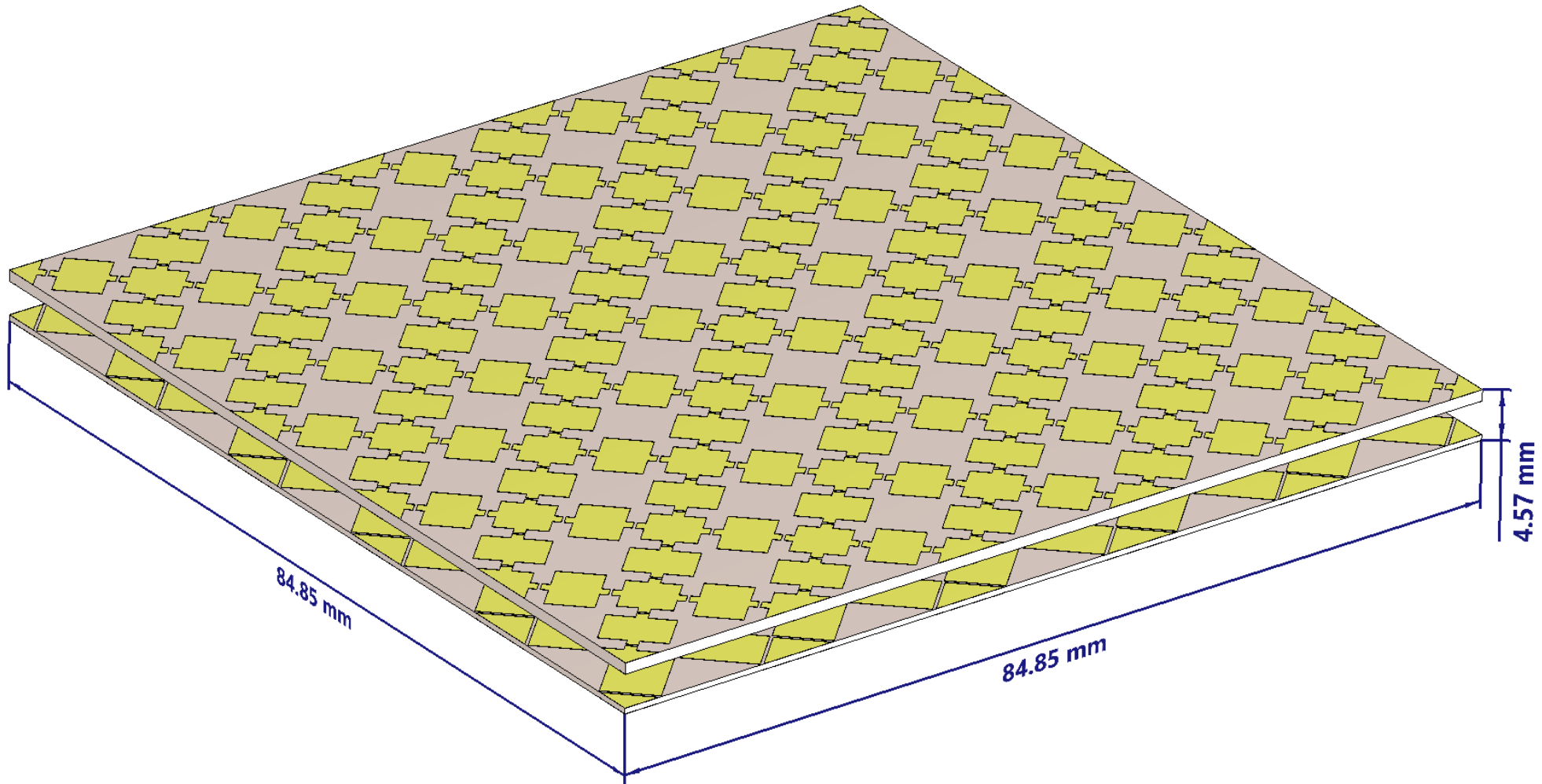
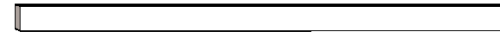


# Prototyypin rakenne

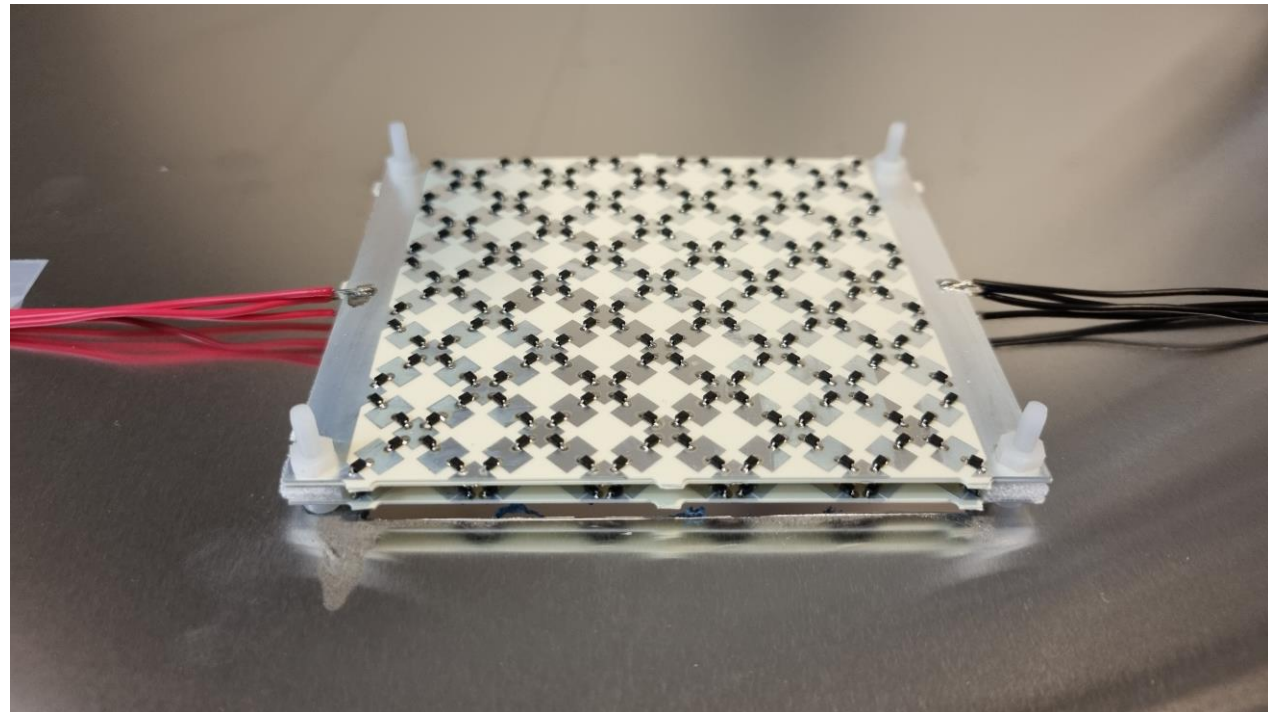
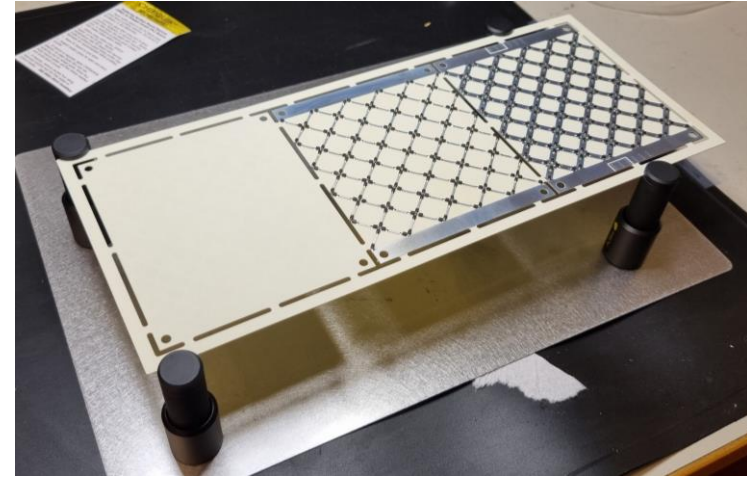
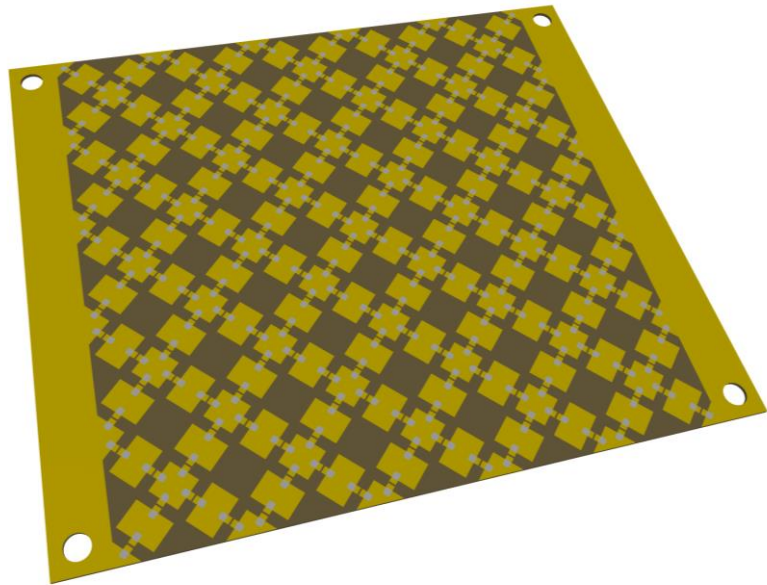
1mm Rogers RO4350B

3mm ilma/vaahto

0.5mm Rogers RO4350B

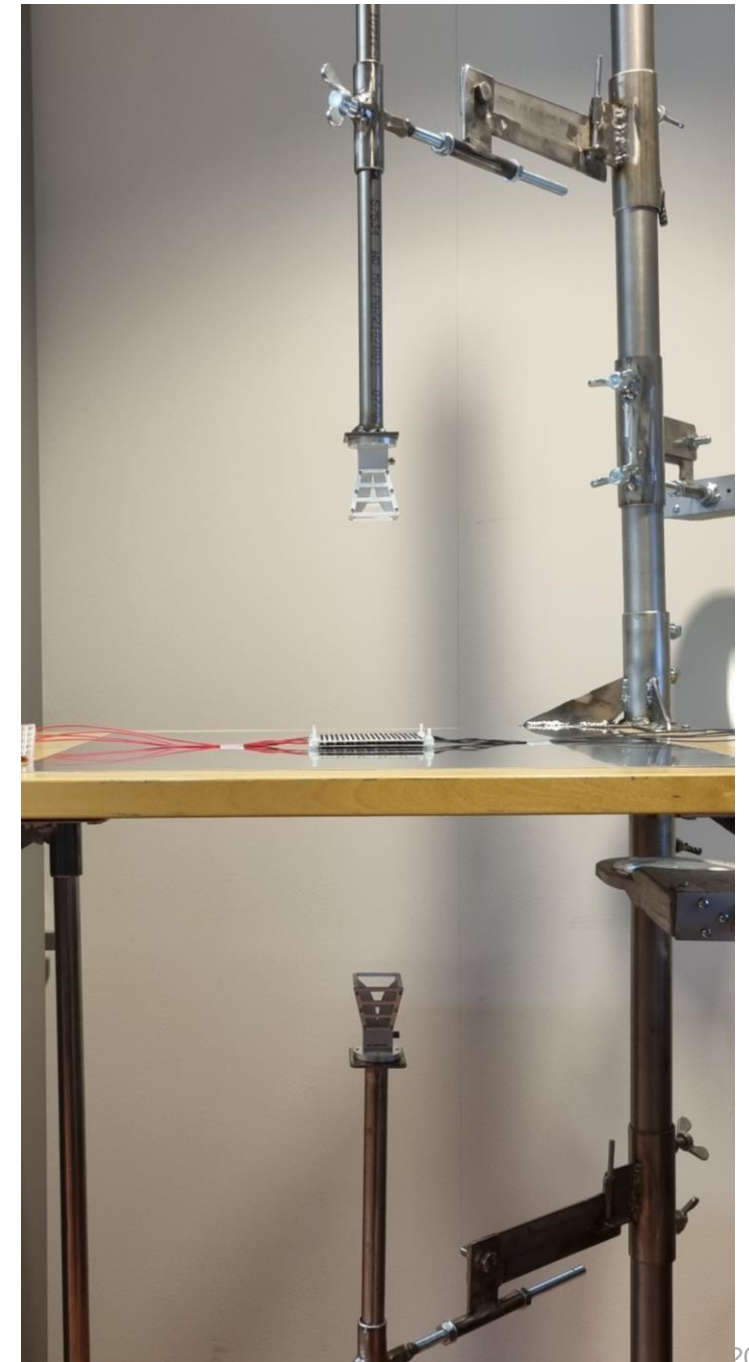


# Prototyypin valmistus



# Prototyypin mittausjärjestely

- Kytkimien johtavuuden ohjaaminen DC-jännitteillä levyn reunalta
- Läpäisykertoimen mittaus torviantenneilla mittauspöydän läpi
- Kalibrointimittaukset ilman prototyyppiä sekä metallilevyn kanssa
  - Poistaa diffraktion ja ylimääräisen sironnan vaikutukset



# Yhteenveto

- Tähän saakka keskitytty koko X-kaistan aktiiviseen päästörakenteeseen
- Simuloitu prototyyppi
  - **90% absorptio** 8.5-12 GHz kaistalla molemmille polarisaatioille OFF-tilassa
  - **Alle 10% läpäisyhäviö** 8-11.25 GHz kaistalla ON-tilassa
- Tieteellinen uutuusarvo
  - -10 dB absorptiota ei aiemmin saavutettu laajalla kaistalla
  - Realistisia mitattavia rakenteita ei esitetty kahdelle polarisaatioille
- Prototyyppi valmistettu
  - Mittaukset käynnissä

# Tulevia vaihteita

- Koko kaistan rakenteeseen absorption parantaminen
  - Passiivissa RAM-materiaaleissa yleensä -20 dB
- Kapeiden kaistanpäästörakenteiden tutkiminen taajuushyppiviin tutkajärjestelmiin
- Aktiiviset radomit oikeiden antennien yhteydessä sekä kaarevilla pinnoilla